

# СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6061 ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ

**Бобрук Е.В.**

*Руководитель – н.с., к.т.н. Мурашкин М.Ю.*

Институт физики перспективных материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

[e-bobruk@yandex.ru](mailto:e-bobruk@yandex.ru)

В работе рассмотрены особенности влияния интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК), осуществленной при комнатной температуре, и последующего искусственного старения на структуру и свойства термически упрочняемого алюминиевого сплава 6061 стандартного химического состава (Al-1.0Mg-0.7Si-0.15Cu-0.2Cr-0.4Fe, вес. %).

Электронно-микроскопический анализ показал, что в результате ИПДК сплава в закаленном состоянии исходная крупнозернистая структура полностью трансформируется в однородную УМЗ структуру со средним размером зерен  $170 \pm 9$  нм (Рис.1а).

Анализ картин электронной дифракции (Рис. 1б) показал, что сформированное УМЗ состояние относится к структуре зеренного типа, имеющее преимущественно большеугловые разориентировки границ. Кроме рефлексов от алюминиевой матрицы, на электронограммах были обнаружены дополнительные рефлексы, индицирование которых, показало, что они принадлежат вторичной упрочняющей фазе  $Mg_2Si$ .

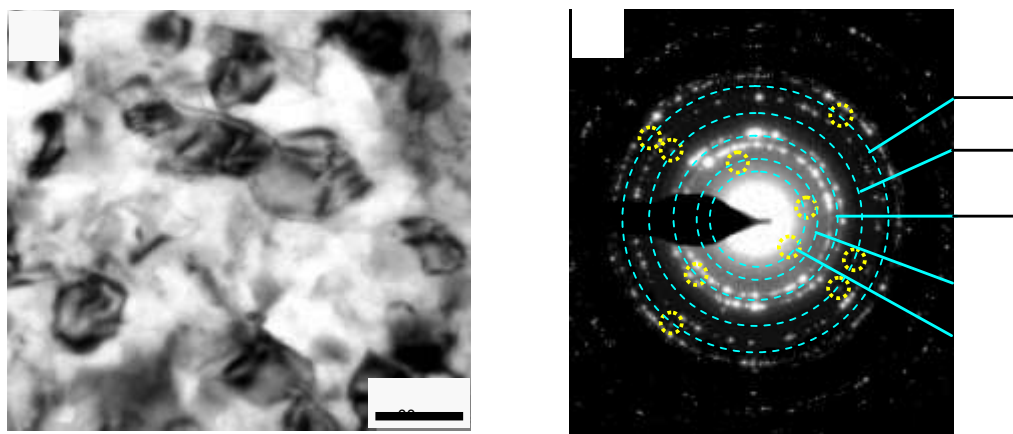


Рис. 1 Структура после обработки ИПДК при комнатной температуре

Наличие этой фазы свидетельствует о том, что при ИПДК, процесс формирования УМЗ структуры в сплаве 6061 сопровождается динамическим деформационным старением (ДДС), которое происходит уже при комнатной температуре.

Данные рентгеноструктурного анализа (РСА), хорошо согласуются с результатами исследований тонкой структуры сплава 6061 после ИПДК. Определенные размеры областей когерентного рассеяния и величина микродеформации кристаллической решетки алюминиевой матрицы, свидетельствуют о высокой степени неравновесности и дисперсности полученной структуры.

Для подтверждения результатов индифференцирования вторичной фазы (Рис.1б) был проведен фазовый РСА УМЗ сплава. Прецизионно была отснята рентгенограмма в интервале углов, в котором расположена дифракционная линия фазы  $Mg_2Si$ , имеющая 100 % интенсивность (Рис.2). Результаты эксперимента подтвердили, что после ИПДК, в УМЗ сплаве присутствуют частицы упрочняющей фазы, и их объемная доля, судя по чувствительности РСА, должна превышать в материале 3 %.

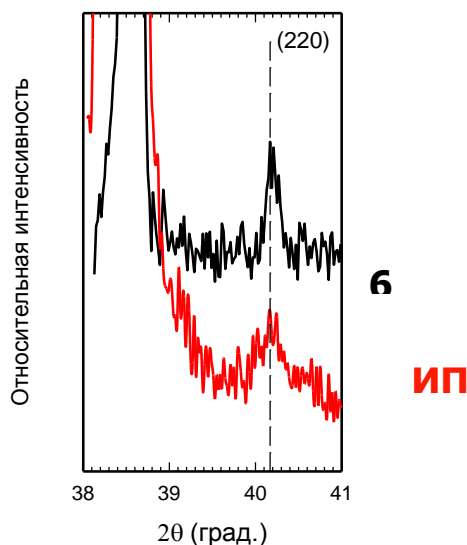


Рис. 2  
Интенсивность линий

С целью исследования термической стабильности материала после ИПДК, заготовки УМЗ сплава были подвергнут отжигу в интервале температур 70...400°C в течение 1 часа (Рис.3А). Установлено, что после отжига 70...160°C твердость материала изменяется незначительно. Заметное разупрочнение УМЗ сплава начинается лишь после отжига при 200°C, а при 250°C его твердость снижается практически до уровня, характерного для сплава после стандартной упрочняющей обработки (Т6). Далее, в соответствии с полученной зависимостью (Рис.3А), с увеличением температуры твердость продолжает снижаться, и после отжига при 400°C достигает значения исходного закаленного сплава.

В температурном интервале 70...160°C, в котором после отжига 1 час не было установлено заметного разупрочнения УМЗ сплава, были проведены дополнительные отжики с выдержкой до 48 часов. Важно отметить, что данный температурный интервал соответствует упрочняющей термической обработке (искусственному старению), которой, как правило, подвергают сплав 6061 после закалки в крупнозернистом состоянии. Судя по полученным результатам (Рис.3Б) искусственное старение УМЗ сплава при температуре 70 и 100°C не приводит к его дополнительному упрочнению. Повышение же температуры старения до 130 и 160°C вызывает разупрочнение УМЗ материала на начальном этапе. Затем, твердость практически не изменяется. Таким образом, было установлено, что сплав 6061 в УМЗ состоянии, полученном ИПДК, дополнительно не упрочняется в процессе искусственного старения. Обнаруженное отсутствие упрочнения в УМЗ сплаве, обусловлено протеканием в ходе старения двух конкурирующих процессов, а именно, возврата УМЗ структуры, приводящего к снижению ее дефектности, и соответственно, к разупрочнению, и дисперсионного твердения, упрочняющего сплав.

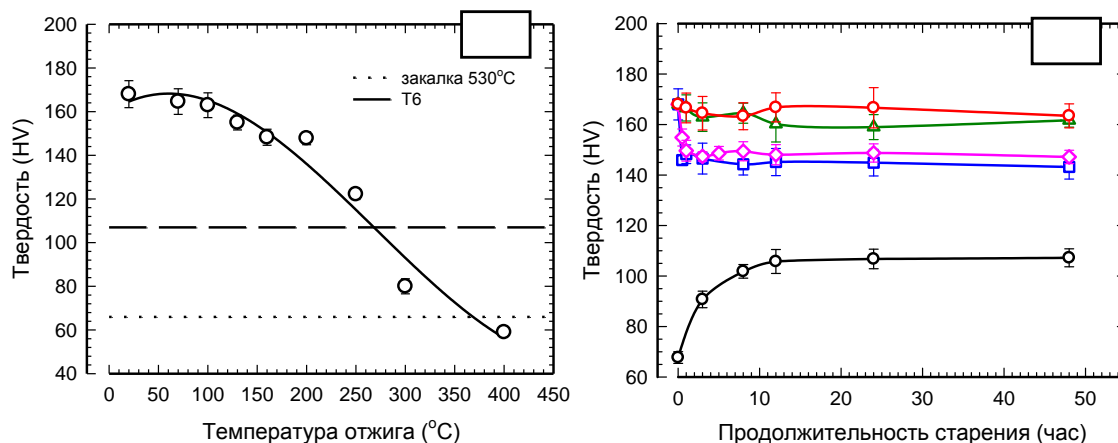


Рис. 3 А) Влияние температуры отжига длительностью один час на твердость сплава 6061 после ИПДК; Б) Влияние температуры и продолжительности старения на твердость заготовок сплава после ИПДК (а - г) и после закалки при 530 °С (д): (а) – при 70 °С; (б) – 100 °С; (в) – 130 °С; (г, д) – 160 °С

Для выявления уровня механических свойств сплава в УМЗ состоянии, сформированном ИПДК, а также после дополнительного искусственного старения, были проведены испытания на растяжение. Для сопоставления также определяли соответствующие характеристики материала после обработки Т6. В таблице представлены полученные результаты.

Таблица Механические свойства алюминиевого сплава 6061

Обработка	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
ИПДК, 6ГПа, КТ, n = 10	$545 \pm 21$	$675 \pm 28$	$10.0 \pm 0.7$
ИПДК + старение при 70°С, 48 ч.	$525 \pm 17$	$660 \pm 20$	$13.8 \pm 1.2$
ИПДК + старение при 160°С, 1 ч.	$495 \pm 20$	$585 \pm 18$	$15.0 \pm 1.0$
Т6	$315 \pm 14$	$385 \pm 16$	$17.1 \pm 1.1$

Как видно из полученных данных, после ИПДК, УМЗ сплав 6061 демонстрирует рекордно высокий уровень прочности, не достигаемый ранее в данном материале, как после стандартных видов упрочняющей обработки, так и после обработки методами ИПД [1]. Дополнительное искусственное старение при 100°С, как было выше показано на Рис.3Б, не приводит к дальнейшему упрочнению УМЗ материала, однако существенно увеличивает его пластичность. Старение осуществленное при 160°С, также улучшает пластичность сплава, однако приводит к его разупрочнению.

Фрактографические исследования УМЗ образцов сплава 6061 после механических испытаний на растяжение позволили установить особенности и механизмы их разрушения.

[1] Murashkin M. et al. Strength of commercial aluminum alloys after equal channel angular pressing and post-ECAP processing // Sol. State Phenomena. 2006. V.114. P.91-96.